

УДК 621.391

М.А. ГОГОЛЕВА, С.В. ГАРКУША, канд. техн. наук, АХМЕД ХАССАН АБЕД

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КАНАЛОВ В МНОГОКАНАЛЬНЫХ MESH-СЕТЯХ СТАНДАРТА IEEE 802.11

Введение

Одним из наиболее перспективных направлений развития современных телекоммуникационных технологий являются беспроводные сети. В первую очередь перспективы их использования связаны с возможностью замены кабельной инфраструктуры на радиоэфир, а также появлением новых возможностей коммуникации между различными устройствами. При этом, наряду с постоянным улучшением доступности связи для мобильных пользователей, рынок беспроводных систем направлен на расширение диапазона предоставляемых пользователю услуг, что в свою очередь требует повышения производительности и улучшения основных показателей качества обслуживания. Существует ряд способов повышения производительности беспроводных телекоммуникационных сетей (ТКС), основными из которых являются: разнесение сигнала по поляризации, изменение территориального местоположения станции, использование технологии интеллектуальных антенных решеток, объединение каналов, использование технологии ММО, использование многоканальных mesh-сетей, маршрутизация [1-3]. Наиболее высокого результата для повышения производительности беспроводной сети можно достигнуть при использовании многоканальных mesh-сетей, предполагающих использование как одного, так и нескольких радиointерфейсов на mesh-станции, каждый из которых настроен на отдельный канал. Однако для реализации многоканальных решений следует учитывать такие факторы, как выбор используемого метода распределения каналов в mesh-сети, совместимость mesh-устройств с точки зрения поддерживаемых стандартов, размерность сети, а также учет особенностей частотного планирования в беспроводной сети (количество неперекрывающихся частотных каналов). В качестве основополагающего фактора, влияющего на эффективность использования многоканальных mesh-сетей, как правило, выступает выбранный метод распределения каналов между станциями в сети.

На сегодняшний день известно достаточно большое количество методов решения задачи распределения каналов в многоканальных mesh-сетях [4-6], основными из которых являются Rate-Adaption Channel Algorithm, C-Hyacinth, D-Hyacinth, CoMTaC. Однако к основным недостаткам известных решений стоит отнести, прежде всего, отсутствие согласованности в решениях подзадач кластеризации, закрепление радиointерфейсов и выделение им соответствующих каналов, а также недостаточный учет аппаратурных и технологических особенностей построения многоканальных mesh-сетей стандарта 802.11, территориальной удаленности и активности mesh-станций. В этой связи в статье предлагается математическая модель распределения каналов в многоканальных mesh-сетях, функционирующих на основе стека стандартов IEEE 802.11a/b/g/n/s, а также ее экспериментальное исследование, подтверждающее ее адекватность и эффективность.

Математическая модель распределения каналов в многоканальных mesh-сетях стандарта 802.11

В рамках предлагаемой модели предполагаются известными следующие данные: $\{R_i, i = \overline{1, N}\}$ – множество mesh-станций, где N – общее их количество в сети; m_j – число радиointерфейсов на mesh-станции R_j ; K – количество неперекрывающихся каналов в mesh-сети. Так, например, в технологии IEEE 802.11 b/g таких каналов $3 \div 4$, а в технологии IEEE 802.11 a – 12 неперекрывающихся каналов.

Пусть $\{G_z, z = \overline{1, Z}\}$ – множество зон устойчивого приема – кластеров (Transmission Range, TR), которые образуют территориально удаленные mesh-станции, где Z – их общее количество в сети. Причем зону устойчивого приема образует множество mesh-станций максимальной мощности, в рамках которой станции могут передавать информацию друг другу, т.е. могут обмениваться данными с помощью выбранной в mesh-сети технологии беспроводной связи.

С целью учета территориальной удаленности mesh-станций сети в математическую модель введено понятие матрицы зон устойчивого приема или TR-матрицы. Матрица является прямоугольной с количеством строк, соответствующим количеству зон устойчивого приема (Z), и с количеством столбцов, соответствующим общему количеству mesh-станций (N) в сети, т.е.

$$D = \|d_{i,j}\|, \quad i = \overline{1, Z}; \quad j = \overline{1, N},$$

где $d_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{если } j\text{-я станция находится в } i\text{-й TR;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$

В рамках предложенной модели в ходе решения задачи распределения каналов по радиоинтерфейсам mesh-станций сети необходимо обеспечить расчет булевой переменной

$$x_{i,j}^k \in \{0,1\} \quad (i = \overline{1, N}; \quad j = \overline{1, m_i}; \quad k = \overline{1, K}), \quad (1)$$

причем $x_{i,j}^k = \begin{cases} 1, & \text{если } j\text{-й РИ } i\text{-й станции работает на } k\text{-м ЧК;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$

Общее количество переменных (1), которые определяют порядок распределения каналов, зависит от количества станций в сети, радиоинтерфейсов, используемых каналов и, соответственно, будет определяться выражением $N \times m \times K$. Результатом расчета переменных (1) должно быть разбиение mesh-сети в целом и каждой зоны устойчивого приема в отдельности на связные между собой домены коллизий, в которых mesh-станции функционируют на одном и том же канале. В связи с этим при расчете искомых переменных $x_{i,j}^k$ в каждой отдельно взятой G_z необходимо выполнить ряд важных условий-ограничений [7-8]:

1. Условие включения i -й станции в сеть:

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{m_i} x_{i,j}^k \geq m^* \quad (i = \overline{1, N}), \quad (2)$$

где $1 \leq m^* \leq m_i$ – целочисленный параметр, характеризующий минимально необходимое число включенных радиоинтерфейсов (РИ) на произвольно выбранной mesh-станции;

$\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{m_i} x_{i,j}^k$ – количество включенных РИ на одной станции.

2. Условие выделения j -му радиоинтерфейсу i -й mesh-станции не более одного канала:

$$\sum_{k=1}^K x_{i,j}^k \leq 1 \quad (i = \overline{1, N}; \quad j = \overline{1, m_i}). \quad (3)$$

3. Условие закрепления k -го канала на i -й mesh-станции не более чем за одним радиоинтерфейсом:

$$\sum_{j=1}^{m_i} x_{i,j}^k \leq 1 \quad (i = \overline{1, N}; k = \overline{1, K}), \quad (4)$$

4. Условие работы двух mesh-станций друг с другом не более чем на одном канале (для одной зоны устойчивого приема):

$$\sum_{k=1}^K \left[\sum_{j=1}^{m_i} x_{i,j}^k \cdot \sum_{l=1}^{m_s} x_{s,l}^k \right] \leq 1, \text{ (для } (i, s)\text{-пары станций, } i, s = \overline{1, N}; i \neq s), \quad (5)$$

которое вводится для устранения нежелательной структурной избыточности и носит квадратичный характер.

5. Условие того, что произвольная mesh-станция на включенном на ее радиointерфейсе и закреплённым за ним каналом работает хотя бы с одной станцией своей зоны устойчивого приема:

$$x_{ij}^k \leq \sum_{\substack{u \in G_z, \\ u \neq i}} \sum_{r=1}^{m_r} x_{ur}^k \quad (i \in G_z, z = \overline{1, Z}, j = \overline{1, m_i}, k = \overline{1, K}), \quad (6)$$

где $\sum_{u \in G_z} \sum_{r=1}^{m_r} x_{ur}^k$ – число станций в зоне устойчивого приема G_z , которые работают на k -м канале.

6. Условие отсутствия эффекта «скрытой станции», то есть станция, которая принадлежит одновременно к нескольким зонам устойчивого приема, не должна работать на одном и том же канале со станциями различных TR:

$$\sum_{j=1}^{m_j} x_{sj}^k \sum_{i \in G_p} \sum_{r=1}^{m_r} x_{ir}^k = \sum_{j=1}^{m_j} x_{sj}^k \sum_{i \in G_*^s} \sum_{r=1}^{m_r} x_{ir}^k \quad (s = \overline{1, N}, k = \overline{1, K}, G_p \in G_*^s), \quad (7)$$

где G_*^s – множество зон устойчивого приема, к которым принадлежит s -я станция.

7. Условие связности сети (связности создаваемых доменов коллизий mesh-станций):

$$p = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{m_i} \sum_{k=1}^K x_{i,j}^k \geq N + K^* - 1, \quad (8)$$

где K^* – количество каналов используемых в mesh-сети.

Два домена mesh-сети связны, если существует mesh-станция, работающая одновременно на каналах этих двух доменов, т.е. первый РИ станции работает на одном канале, а второй ее РИ работает на другом канале. Две mesh-станции связны, если они находятся в одной зоне устойчивого приема и в одном домене коллизий, т.е. работают на одном канале. Целесообразно, чтобы количество mesh-станций в доменах было одинаковым, т.е. имела место балансировка количества mesh-станций в домене. С этой целью введем условие балансировки mesh-станций в домене коллизий.

8. Условие балансировки числа mesh-станций по доменам коллизий в зависимости от территориальной удаленности, активности станций и количества зон устойчивого приема, будет иметь несколько интерпретаций.

8.1. Если все станции находятся в одной TR, условие балансировки числа mesh-станций по доменам коллизий будет иметь следующий вид:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{m_i} x_{i,j}^k \leq \alpha \quad (k = \overline{1, K}), \quad (9)$$

где $\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{m_i} x_{i,j}^k$ – число mesh-станций в сети, работающих на k -м канале; α – верхний дина-

мически управляемый порог числа mesh-станций в произвольно выбранном домене коллизий в многоканальной mesh-сети.

8.2. При учете территориальной удаленности станций, т.е. при нахождении станций в разных зонах устойчивого приема, условие балансировки будет иметь следующий вид:

$$\sum_{i=1}^N d_{z,i} \sum_{j=1}^{m_i} x_{i,j}^k \leq \alpha \quad (\text{для каждой } (z, k) \text{-пары, } i = \overline{1, N}; k = \overline{1, K}, j = \overline{1, m_i}), \quad (10)$$

где в левой части неравенства представлено число mesh-станций в z -й зоне устойчивого приема.

8.3. Важным фактором при балансировке числа mesh-станций по доменам коллизий является их активность, под которой в данном случае будем понимать частоту выхода станции в радиоэфир, длительность сеансов и интенсивность передаваемого трафика. В связи с этим, условие балансировки mesh-станций по доменам коллизий может принять следующую формулировку:

$$\sum_{i=1}^N d_{z,i} \cdot \beta_i \sum_{j=1}^{m_i} x_{i,j}^k \leq \alpha \quad (\text{для каждой } (z, k) \text{-пары, } z = \overline{1, Z}, k = \overline{1, K}), \quad (11)$$

где β_i – коэффициент активности i -й станции, который зависит от количества подключенных пользователей, интенсивности входящего и исходящего трафика, типа трафика (речь, видео, данные).

8.4. В связи с неравномерной нагрузкой на РИ mesh-станции и ввиду работы их по различным направлениям, для получения более точной формализации в условии (11) рекомендуется использовать нормированный коэффициент активности mesh-станций

$$\sum_{i=1}^N d_{z,i} \cdot \frac{\beta_i}{\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{m_i} x_{i,j}^k} \sum_{j=1}^{m_i} x_{i,j}^k \leq \alpha \quad (\text{для каждой } (z, k) \text{-пары, } z = \overline{1, Z}, k = \overline{1, K}), \quad (12)$$

где $\frac{\beta_i}{\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{m_i} x_{i,j}^k}$ – нормированный коэффициент активности станции, который учитывает рас-

пределение трафика i -й станции по подключаемым радиointерфейсам, т. е. по смежным mesh-станциям.

Расчет искоемых переменных (1) и параметра α в соответствии с условиями, формализованными неравенствами (2)-(12), целесообразно осуществить в ходе решения оптимизационной задачи, обеспечивая минимум или максимум предварительно выбранного критерия качества решения задачи распределения каналов в многоканальной mesh-сети. В связи с тем, что количество станций в территориально-распределенных mesh-сетях значительно преобладает над количеством каналов и существует необходимость решения таких проблем как интерференция и эффект «скрытой» станции, в качестве подобного критерия был выбран минимум числа работающих mesh-станций в создаваемых доменах коллизий, что, как известно

[6-8], способствует повышению общей производительности многоканальной mesh-сети. Тогда в рамках предложенной математической модели (1)-(12) задача распределения каналов в mesh-сети приобретает вид оптимизационной, в ходе решения которой необходимо обеспечить выполнение следующего критерия

$$\min_{x, \alpha} \alpha \quad (13)$$

при учете условий (1)-(12).

Исследование разработанной модели распределения каналов в многоканальных mesh-сетях стандарта 802.11

При решении поставленных задач для получения наиболее полной информации о функционировании беспроводной сети на базе предложенной модели использовались средства аналитического и имитационного моделирования. Для проведения имитационного моделирования первоначально были проанализированы наиболее используемые программные пакеты (симуляторы), которые способны с определенной точностью моделировать функционирование mesh-сети в целом или отдельных ее процессов. К основным из них относятся Network Simulator v.2 и v.3, OPNET, Wi-Fi Simulator 802.11, Wi-Fi Mesh Simulator Pro, OMNET [9-10]. Однако в результате сравнительного анализа перечисленных симуляторов был выбран пакет Network Simulator v.3 (ns3). Выбор пакета ns3 обусловлен наличием необходимой математической поддержки, что позволило генерировать различные виды трафика в mesh-сетях. Гибкость использования ns3 заключалась в возможности реализовывать собственные математические функции в частности на языке на C++ для исследования предложенных моделей и методов распределения каналов в многоканальных mesh-сетях. В рамках ns3 также предоставляется полное управление каналами, количеством радиointерфейсов, расстоянием между mesh-станциями и другими параметрами mesh-сети, а также поддерживается возможность мониторинга таких показателей качества обслуживания сети как средняя задержка, джиттер, производительность, уровень потерь и т.д.

Основной задачей экспериментального исследования предложенной модели является анализ влияния процесса распределения каналов за радиointерфейсами mesh-станций на показатели качества обслуживания (например, среднюю задержку и джиттер). Для проведения имитационного моделирования на базе ns3 была создана имитационная модель, структура которой представлена в виде взаимосвязанных блоков (рис. 1).

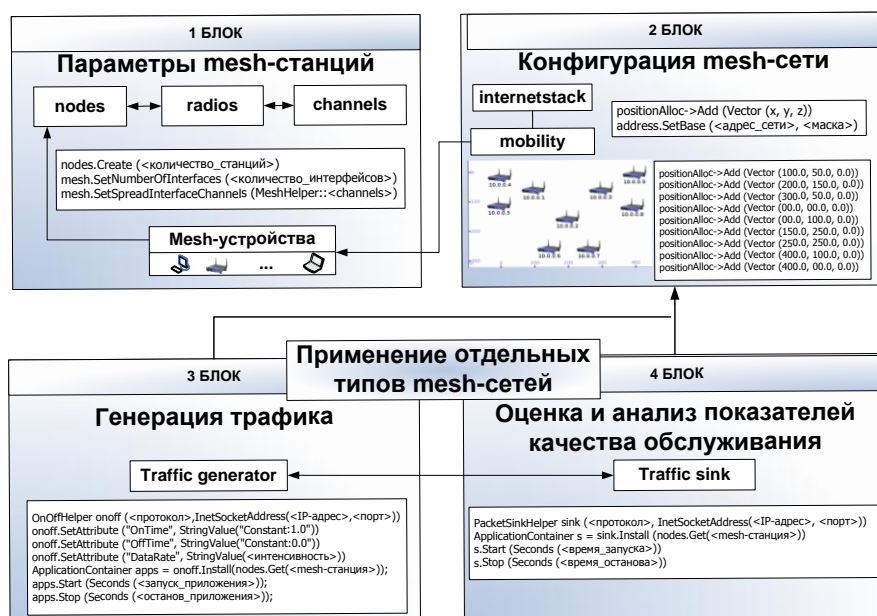


Рис. 1

Как показано на рис.1 первый блок в структуре имитационной модели распределения каналов содержит три основных подблока: «nodes», «radios» и «channels». В подблоке «nodes» задается количество mesh-станций, которые будут созданы в процессе моделирования, в подблоке «radios» – количество радиоинтерфейсов на каждой станции, а в подблоке «channels» – количество используемых каналов в mesh-сети.

Второй блок определяет конфигурацию mesh-сети, которая описывает территориальную удаленность каждой mesh-станции в сети и назначение ей IP-адресов. Для учета территориальной удаленности mesh-станций использовалась функция позиционирования, которая задает значения по трём осям координат, предоставляя, тем самым, возможность размещения в пространстве каждой mesh-станции в сети.

Для задания IP-адресов интерфейсам станций использовалась функция назначения mesh-станциям начальных сетевых адресов и масок подсети, к примеру 10.0.0.0 или 192.168.1.0 и 255.255.255.0. Далее каждой созданной mesh-станции назначался IP-адрес в автоматическом порядке согласно алгоритму симулятора.

Третий блок в структуре имитационной модели (рис. 1) представляет собой набор функций, отвечающий за генерирование трафика и задание его характеристик, и в котором указывается:

- протокол транспортного уровня (ns3::TcpSocketFactory, ns3::UdpPacketFactory и т.д.);
- адрес станции-получателя трафика;
- интенсивность генерируемого трафика;
- время запуска приложения на выполнение и время его остановки.

Четвертый блок представляет собой набор функций, отвечающих за прием и анализ трафика (рис. 1). В данном блоке проводится анализ принятых пакетов на станции-получателе, на которую были отосланы пакеты из приложения-генератора трафика. Причем, для того чтобы приложение-получатель могло принимать трафик от приложения-генератора, оно должно быть установлено на соответствующей станции и настроено на анализ соответствующего IP-адреса, порта и протокола. Для этого, в приложении данного блока задается:

- тип протокола, IP-адрес и порт, на который адресуется трафик из приложения-генератора;
- адрес станции, на которой будет осуществлен анализ трафика;
- время запуска приложения на выполнение и время его остановки;
- задание общей длительности выполнения модели – Simulator::Stop (Seconds(<длительность>)).

На основании имитационной модели был проведен анализ показателей эффективности распределения каналов в многоканальных mesh-сетях различных типов, т.е. с различным количеством используемых радиоинтерфейсов на станции и каналов [11-12]:

- mesh-сети, использующие один радиоинтерфейс и один канал (Single-Radio Single-Channel Wireless Mesh Networks, SR SC WMN) и которые предназначены для организации абонентского доступа и транспортного канала между точками;

- mesh-сети, использующие два радиоинтерфейса и один канал (Dual-Radio Single-Channel Wireless Mesh Networks, DR SC WMN), в которых один из радиоинтерфейсов применяется для организации абонентского доступа (2,4 ГГц), а другой, для транспортного канала (5,8 ГГц);

- многоканальные mesh-сети, использующие один радиоинтерфейс (Single-Radio Multi-Channel Wireless Mesh Networks, SR MC WMN), позволяют организовать (так же, как и в решениях DR SC WMN) разделение абонентского и транспортного потоков, но благодаря возможности переключения одного радиоинтерфейса с канала, организующего абонентский доступ на транспортный канал позволяет избавиться от интерференционных помех;

- многоканальные mesh-сети, использующие несколько радиоинтерфейсов (Multi-Radio Multi-Channel Wireless Mesh Networks, MR MC WMN), благодаря чему существует возможность увеличения производительности беспроводной сети в среднем 2-3 раза по сравнению с

SR SC WMN за счет уменьшения количества станций, работающих на одном канале, избавится от проблемы «скрытой» станции, интерференционных помех и т.д.

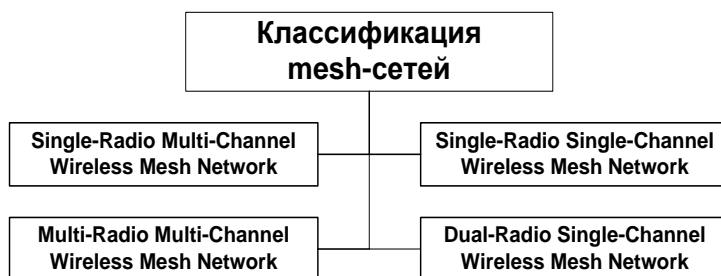


Рис. 2

Экспериментальные исследования были проведены в рамках предложенной модели распределения каналов по показателям качества обслуживания (средняя задержка, джиттер, потери пакетов и т.д.) для различной интенсивности трафика (от 128 Кбит/с до 3 Мбит/с). В случае перегрузки mesh-сети, т.е. при резком ухудшении показателей средней задержки и джиттера, рост интенсивности генерирования трафика прекращался.

Для проведения имитационного моделирования в пакете ns3 количество mesh-станций варьировалось от 5 до 50. После территориального распределения mesh-станций производилось автоматическое назначение IP-адресов, настройка приложения-генератора трафика и приложения-анализатора трафика (рис. 1). Для оценки эффективности функционирования многоканальной mesh-сети на базе разработанной модели, т.е. mesh-сети типа Multi-Radio Multi-Channel, при имитационном моделировании за основу были взяты основные функции, настроенные в соответствии с моделью (1)-(13) на согласованное решение таких задач, как выделение радиоинтерфейсов на mesh-станциях и закрепление за ними каналов. В результате моделирования mesh-сети на базе предложенной модели распределения каналов были получены зависимости средней задержки от интенсивности трафика (рис. 3).

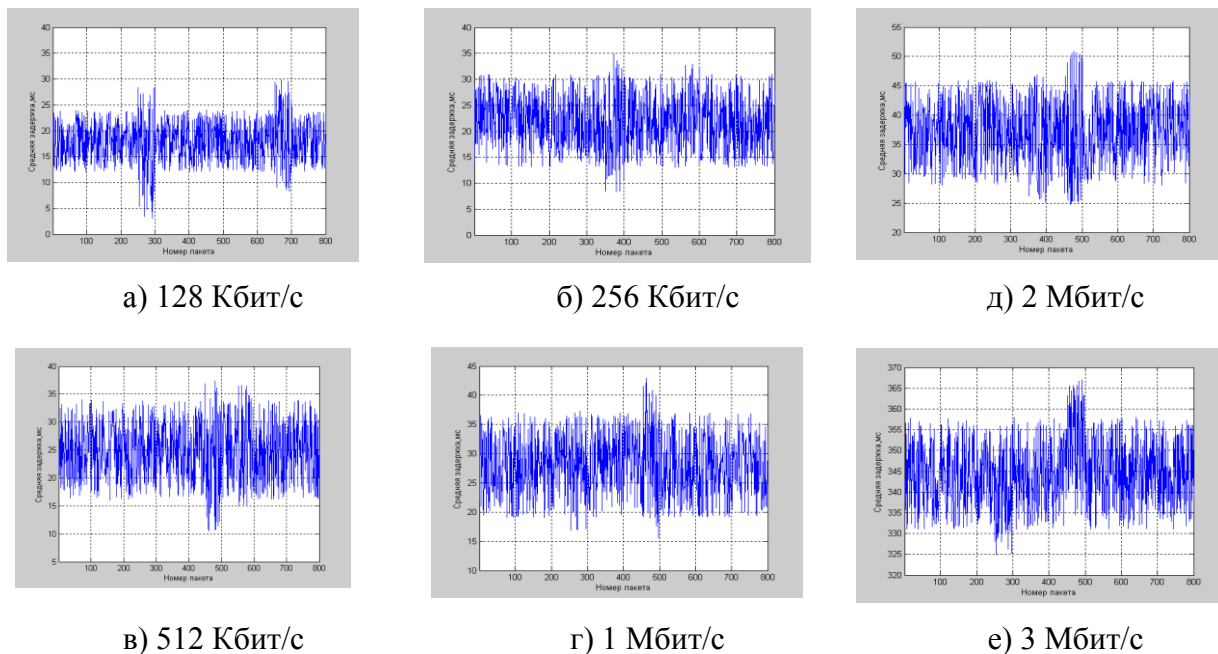


Рис. 3

Результаты усредненных значений средней задержки и джиттера при моделировании различных типов многоканальных mesh-сетей приведены в табл. 1.

Таблица 1

Интенсивность трафика	SR SC WMN		SR MC WMN		DR MC WMN		MR MC WMN	
	Средняя задержка, мс	Джиттер, мс	Средняя задержка, мс	Джиттер, мс	Средняя задержка, мс	Джиттер, мс	Средняя задержка, мс	Джиттер, мс
128 Кбит/с	26	10	21	7	15	7	18	6
256 Кбит/с	30	14	24	9	23	8	21	7
512 Кбит/с	35	16	28	12	26	10	24	9
1 Мбит/с	37	18	39	16	35	14	28	12
2 Мбит/с	687	40	607	38	38	17	37	18
3 Мбит/с	-	-	-	-	345	40	340	38

Анализируя результаты моделирования многоканальной mesh-сети типа Multi-Radio Multi-Channel стоит отметить, что при исследовании функционирования многоканальной mesh-сети на базе разработанной модели распределения каналов перегрузка произошла при интенсивности 3 Мбит/с, что на 20-25% выше, чем при исследовании известного централизованного метода распределения каналов C-Huacinth. Также при интенсивностях трафика до 2 Мбит/с наблюдалась стабильность показателей задержки и джиттера, что свидетельствует об увеличении производительности сети на базе предложенной модели распределения каналов. Таким образом, при исследовании различных типов mesh-сетей посредством имитационного моделирования на базе симулятора ns3 установлено, что использование многоканальных mesh-сетей типа Multi-Radio Multi-Channel на базе разработанной модели приводит к значительному улучшению показателей качества обслуживания сети относительно других типов mesh-сетей исходя из показателей качества обслуживания.

Результаты сравнительного анализа различных типов mesh-сетей для наглядности представлены на одном графике (рис. 3), который отображает зависимость средней задержки для различных значений интенсивности потока.

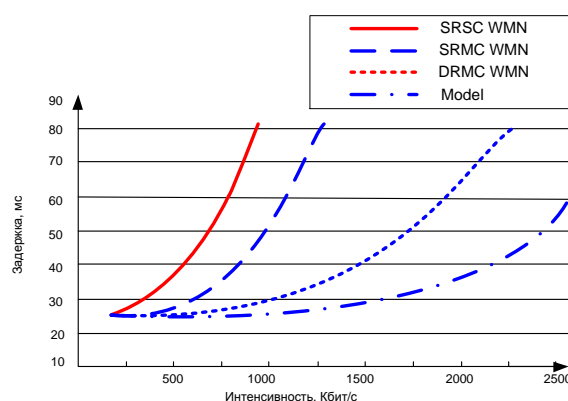


Рис. 3

Из рис. 3 видно, что при моделировании различных типов mesh-сетей явное преимущество по показателям задержки имеет многоканальная mesh-сеть типа MR MC, в основу которой положена разработанная модель распределения каналов, что подтверждает функциональность сети относительно других известных методов распределения и повышает производительность сети в среднем в 1,7-2 раза.

Для наглядного сравнения различных типов mesh-сетей по показателям джиттера на рис. 4 представлены соответствующие его зависимости от интенсивности трафика.

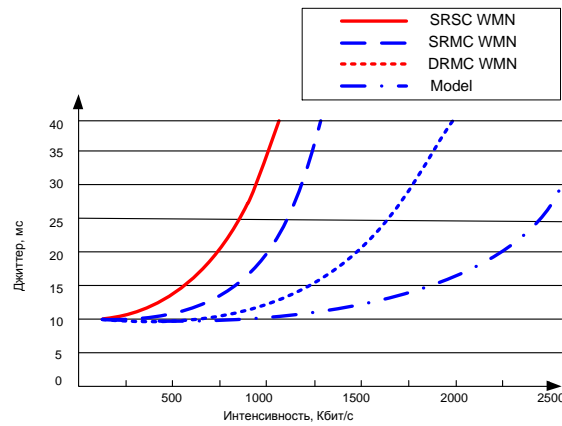


Рис. 4

Результаты анализа свидетельствуют о том, что использование предложенной модели позволяет повысить производительность сети в среднем в 1,5-1,7 раз по сравнению с тип сетью DR MC WMN, и в 2,4- 2,7 раза по сравнению с решением на базе SR MC WMN. Для фиксированной производительности сети, использования разработанной модели привело к улучшению средней задержки в 1,6-2,3 раза, а джиттера, в 1,7-2,5 раза по сравнению с методом C-Нуасинт [13, 14].

Выводы

В статье представлены экспериментальные исследования разработанной модели с использованием возможностей пакета имитационного моделирования ns3. Проанализированы mesh-сети таких типов, как Single-Radio Single-Channel, Single-Radio Multi-Channel, Dual-Radio Multi-Channel. Осуществлен анализ показателей эффективности распределения каналов в многоканальных mesh-сетях предложенной модели по показателям качества обслуживания.

В ходе сравнительного анализа установлено, что использование предложенной модели позволяет повысить производительность сети в среднем в 1,5-1,7 раза или улучшить среднюю задержку в 1,6-2,3 раза, а джиттер – в 1,7-2,5 раза по сравнению с методом C- Нуасинт. Кроме того, реализация предложенного решения позволяет повысить производительность mesh-сети в среднем в 1.2-1.8 раза по сравнению с методом CoMTaC, и в 1,3-1,85 раза по сравнению с методом C-Нуасинт в условиях роста количества mesh-станций, неравномерности их территориальной удаленности и активности.

Полученные результаты свидетельствуют в целом об адекватности предложенной модели и ее отдельных условий, т.е. в результате расчетов была сформирована связанная структура доменов коллизий, что позволяет обеспечить информационный обмен между произвольной парой станций многоканальной mesh-сети. Также использование разработанной модели распределения каналов не только способствует повышению производительности многоканальной mesh-сети, но и, благодаря введенным условиям, позволяет избавиться от эффекта «скрытой» станции, уменьшить интерференцию, взаимные помехи, влияния и т.д.

Предложенная модель распределения каналов отвечает требованиям современных концепций по построению и функционированию многоканальных mesh-сетей, расширяя область их применения. Практическая реализация разработанной модели и метода распределения каналов не связана с коренным пересмотром принципов построения и функционирования существующих беспроводных сетей.

Список литературы: 1 Рошан П. Основы построения беспроводных локальных сетей стандарта 802.11: пер. с англ. / П. Рошан, Д. Лиэри. Пер. с англ. М.: Издат. дом «Вильямс», 2004. 304 с. 2. Aggielou G. Wireless Mesh Networking // G. Agg'elou, B.Eng. Athens, 2009. 548 p. 3. IEEE P802.11s/D1.0. Draft STANDARD for Information Technology // Telecommunications and information exchange between systems. Local and metropolitan area

networks. Specific requirements. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications Amendment: Mesh Networking [Electronic resource] // IEEE Standards Activities Department. [USA]: IEEE, 2006. 4. *IEEE P802.11s/D2.0. Draft STANDARD for Information Technology* // Telecommunications and information exchange between system. Local and metropolitan area networks. Specific requirements . 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications Amendment: Mesh Networking [Electronic resource] / IEEE Standards Activities Department.[USA]: IEEE, 2008. 5. *Ляхов А.И., Пустогаров И.А., Шпилев С.А.* Многоканальные mesh-сети: анализ подходов и оценка производительности // Информационные процессы. 2008. Т. 8, № 3. С. 173-192. 6. *Лемешко А.В., Гоголева М.А., Симоненко Д.В.* Модель распределения частотных каналов с учетом территориальной удаленности станций в многоканальных mesh-сетях // Збірник наукових праць Харківського університету повітряних сил. Харків, 2009. Вип. 4(22). С. 38-41. 7. *Гоголева М.А.* Обзор и классификация методов распределения частотных каналов в многоканальных mesh-сетях // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2009. Вып. 159. С. 117-121. 8. *Naveed A., Salil S. Kanhere, Sanjay K. Jha.* Topology Control and Channel Assignment in Multi-radio Multi-channel Wireless Mesh Networks // Proc. of MASS '07. PP. 1-9.1975. Vol. 25, №1. P.73-85. 9. *Vaidya N.* Multi-Channel MAC for Ad Hoc Networks: Handling Multi-Channel Hidden Terminals Using a Single Transceiver / N. Vaidya, So J. // ACM MobiHoc, 2004. P. 222-233. 10. *Issariyakul Teerawat* Introduction to Network Simulator NS2 / Teerawat Issariyakul, Ekram Hossain. Springer Science+Business Media, 2009. 400 p. 11. *Draves R.* Routing in multi-radio, multi-hop wireless mesh networks // In ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM), 2004. P. 114-128. 12. *Alicherry M.* Joint Channel Assignment and Routing for Throughput Optimization in Multi-radio Wireless Mesh Networks // In ACM MobiCom, Cologne, Germany, 2005. P. 237- 255. 13. *Лемешко А.В., Гоголева М.А.* Трехиндексная математическая модель распределения частотных каналов в многоканальных MESH-сетях.// Збірник наукових праць. НАУ ПМЕ. ім. Г.Є. Пухова. № 54. Львів, 2009. С.94-103. 14. *Raniwala A., Gopalan K., Chiu T.* Centralized channel assignment and routing algorithms for multi-channel wireless mesh networks // ACM Mobile Computing and Communications Review. 2004. Vol. 8. PP. 50-65.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию